共和盆地不同灌木群落生物土壤结皮理化性质差异

张曼玉[1,2]， 王志涛[2]， 邓 磊[2,3]， 周 虹[2]

（1. 青海大学农牧学院，青海 西宁 810016；2. 青海大学农林科学院，青海 西宁 810016；
3. 青海省林业和草原项目服务中心，青海 西宁 810016）

摘 要：探究青海共和盆地不同灌木群落生物土壤结皮（Biological Soil Crusts，BSCs）理化性质差异，为加强生物土壤结皮资源的保护与合理利用提供理论参考。选取共和盆地沙蒿（*Artemisia desertorum*）、小叶锦鸡儿（*Caragana microphylla*）和乌柳（*Salix cheilophila*）群落中不同发育阶段的生物土壤结皮为研究对象，野外取样结合室内分析，研究其颗粒组成及养分特征。结果表明：三种灌木群落生物土壤结皮的颗粒组成均以沙粒为主（45%~90%），其中，小叶锦鸡儿沙粒含量>乌柳>沙蒿，且其含量均显著低于灌丛间裸沙。乌柳群落生物土壤结皮全氮、全碳、有机质、有效磷、速效钾、碱解氮、全磷含量均显著高于沙蒿、小叶锦鸡儿群落，且随生物土壤结皮发育，各含量在三种灌木群落中呈增加趋势。灌木群落对生物土壤结皮理化性质的影响程度最高，且灌木生物量与生物土壤结皮盖度、厚度、全氮、全碳、有机质、有效磷、速效钾、碱解氮、全磷呈显著正相关，与沙粒含量呈显著负相关（$P<0.05$）。灌木群落有效改良共和盆地沙地生物土壤结皮土壤结构，沙蒿群落更有利于土壤的细化，乌柳群落更有利于养分蓄积。

关键词：生物土壤结皮；灌木群落；理化性质差异；共和盆地

干旱区生态环境恶劣，水资源及植物类群相对匮乏，植物群落平均盖度通常低于30%~40%，而生物土壤结皮广泛分布，甚至占到干旱区地表面积的70%[1-2]。生物土壤结皮是由藻类、地衣、藓类和微生物通过菌丝体、假根和分泌物等与土壤表层颗粒胶结而成的复杂地表覆盖体[3]。生物土壤结皮的发育阶段主要包括微生物结皮→藻结皮→地衣结皮→藓类结皮4个阶段[4-6]。生物土壤结皮的形成和发育可为植被的生存提供有利环境，从而促进植被生长。此外，生物土壤结皮可以有效改变土壤的理化性质，影响荒漠地区地表径流、减少土壤侵蚀（风蚀、水蚀）、促进养分循环等[7]。

上世纪80年代以来，我国学者陆续开展了大量有关生物土壤结皮的研究，研究区域主要包括腾格里沙漠、古尔班通古特沙漠、库布齐沙漠、浑善达克沙地和毛乌素沙地等，迄今已有大量研究[8-11]，也是近年来干旱地区研究的热点，共和盆地沙地的相关研究相对较少。已有相关研究集中于探讨生物土壤结皮的分布、生物土壤结皮对土壤抗蚀性、对土壤水分及理化属性的影响等[12-13]，然而就生物土壤结皮的时空分布及其影响因素方面仍有深化的空间，特别是高等维管束植物下生物土壤结皮的理化属性方面还有待进一步研究，不同植被群落之间生物土壤结皮土壤理化性质的对比研究相对较少。崔燕等[14]在鄂尔多斯沙地的研究中发现沙地柏群落中分布的生物土壤结皮，其结皮层中的各种养分含量均要高于油蒿、沙柳和羊柴群落。周小泉等[15]在毛乌素沙地的研究中发现沙柳及沙蒿群落生物土壤结皮土壤养分含量高于樟子松群落。在沙漠地区，关于生物土壤结皮盖度、厚度、理化性质等如何随灌木群落种类的变化而变化的研究数据非常有限，尤其是地处高寒沙区的共和盆地，其不同灌木与生物土壤结皮的交互作用是否存在差异目前还尚未可知。

青海共和盆地沙地位于青藏高原东北部，地理位置特殊，是我国西北地区土地荒漠化的典型地区之一。由于海拔较高，使其具有气温较低、降水少、蒸发量高、风频高、风力大、辐射强等气候特点，在

收稿日期：2023-02-22； **修订日期**：2023-06-05
基金项目：青海省重点研发与转化计划（2022-NK-168）
作者简介：张曼玉（1998-），女，硕士研究生，主要从事干旱区土壤生态学研究. E-mail: 2081452199@qq.com
通讯作者：周虹. E-mail: hongzhou199@163.com

流动沙地上沙生植被很难自然恢复，采用多种植物固沙模式，积极开展防沙治沙，建立了大面积的人工固沙植被恢复区[16]。在流动沙地上采用的主要造林树种有小叶锦鸡儿、沙蒿和乌柳等，形成了不同灌木固沙林镶嵌分布的沙地景观。沙蒿茎多数丛生，阻沙作用好；小叶锦鸡儿为深根性树种，主根明显，侧根发达，固沙能力很强；乌柳作为一种耐寒抗旱的灌木或小乔木，根系发达，引入共和盆地已有近40 a的历史。选择相同地形、初始环境条件均一致的流沙上栽植三种灌木群落，经多年发育，灌丛间伴生出大量的生物土壤结皮覆盖地表，对维持沙丘稳定，减缓沙漠化发生发挥着重要作用。本研究拟通过分析共和盆地沙地沙蒿、小叶锦鸡儿和乌柳群落中发育的生物土壤结皮颗粒组成及养分特征，旨在探究同一沙区内相同环境条件下生物土壤结皮理化性质是否因灌木群落的不同而发生变化，为全面了解灌木群落与生物土壤结皮的相互作用关系，加强土壤功能稳定性的评估，深入认识共和盆地沙地生物土壤结皮的形成发育和生态功能提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省林业和草原局下属海南州沙珠玉乡治沙试验站（100°25′E，36°24′N），实验站地处于青藏高原东北部的共和盆地，其风蚀作用频繁强烈，气温较低，太阳辐射较强，水资源稀缺，生态环境脆弱，植被覆盖率低，是我国西北地区荒漠化的典型地区之一[17]。该区海拔高度约2871 m，年平均气温为1.0~2.4 ℃，年降水量为311~402 mm，年蒸发量为1716.7 mm，年均风速为2.1~2.7 m·s^{-1}[18]。土壤类型为棕钙土和栗钙土，非地带性土壤为草甸土、盐土和风沙土。

共和盆地沙地面积较大，海拔较高，高寒、干旱的气候条件，导致沙珠玉地区的植被种类相对较少，群落结构较简单。灌木植物主要包括沙蒿、小叶锦鸡儿、乌柳、沙棘（*Hippophae rhamnoides*）等；草本植物主要有赖草（*Leymus secalinus*）、甘草（*Glycyrrhiza uralensis*）、针茅（*Stipa capillata*）、早熟禾（*Poa pratensis*）等。沙蒿、小叶锦鸡儿和乌柳群落为共和盆地沙地人工固沙植被中三种典型灌木群落，群落盖度在40%~60%，平均高度约0.8~3.1 m，乌柳最高可达5.4 m。不同发育阶段的生物土壤结皮在三种灌木群落灌丛间分布，其基本特征如下（图1）：微生物结皮呈灰白色，薄而脆、易破碎、抗风蚀性差，厚度一般小于3 mm；藻结皮颜色一般呈黑褐色，表面呈现凹凸不平的褶皱状，厚度一般为3~8 mm；地衣结皮是真菌与藻类或蓝细菌共生的团聚体，形态一般呈壳状、叶状和胶质状，厚度一般为5~10 mm；藓类结皮干燥时呈黑色、黑褐色，水分充足时则为绿色，其表层藓类植物生长密集，厚度一般为10~12 mm[19]。

1.2 样地设置与样品采集

于2021年8月下旬，在研究区内分别选取以沙蒿、小叶锦鸡儿和乌柳群落为建群种的植物群落设置样地，每种固沙灌木选取三个面积为100 m×100 m的样地。样地内设置5 m×5 m的灌木群落样方，10 cm×10 cm的生物土壤结皮小样方进行调查。用样方法计算盖度，同时用游标卡尺测定结皮的厚度，重复测量三次后得生物土壤结皮盖度及厚度结果（表1）。在每个样地内，根据标准采样法采集裸沙和不同类型的生物土壤结皮。裸沙样品的采集厚度为2 cm。在各样地内随机采集不同发育阶段的结皮，3个样品充分混合后成为一个样品。采集时，先用直径9.0 cm的培养皿划定采集范围，再用无菌铲将结皮层与下层土壤进行分离，取样用品均在取样间隙用75%酒精消毒。

本研究共采集样品30个，包括裸沙样品×3个重复，沙蒿、小叶锦鸡儿和乌柳群落样地分别采集9个（微生物结皮、藻结皮、藓类结皮×3个重复）共27个











图1 不同发育阶段的生物土壤结皮

Fig. 1 Different developmental stages of biological soil crusts

表1　研究区生物土壤结皮分布特征

Tab. 1　Distribution characteristics of the biological soil crusts in study area

灌木群落	发育阶段	结皮盖度/%	结皮厚度/mm
沙蒿群落	微生物结皮	18.81±2.18	3.26±2.08
	藻结皮	38.17±5.64	10.25±2.57
	藓类结皮	48.73±2.41	13.76±1.24
小叶锦鸡儿群落	微生物结皮	20.68±1.31	2.09±0.50
	藻结皮	29.27±6.19	5.48±0.50
	藓类结皮	43.38±2.13	13.23±0.43
乌柳群落	微生物结皮	70.46±16.73	4.88±0.82
	藻结皮	67.85±10.33	10.55±1.19
	藓类结皮	87.65±3.58	14.46±0.51

注:表中数据为平均值±标准差,n=3。下同。

样品。采集好的样品装入无菌的封口袋,用于后续分析。封口袋的样品过2 mm筛去除碎石和植物残体后分为两部分,一部分置于4 ℃冰箱,尽快用于铵态氮、硝态氮的测定,剩余部分自然风干,用于全氮、全碳、有机质、有效磷、速效钾、碱解氮、pH、全钾和全磷的测定。

1.3　样品理化性质测定

生物土壤结皮理化性质测定指标及方法具体如下,全碳和全氮含量用元素分析仪进行测定(2400II CHN elemental analyzer; Perkin- Elmer, USA)。用重铬酸钾-外加热法分析计算有机质含量。速效钾含量测定采用1 mol pH 7.0乙酸铵浸提-火焰光度法。碱解氮含量测定采用碱解-扩散法。10 g样品溶于50 mL蒸馏水中,用酸度计进行pH值的测定。有效磷含量采用钼锑抗比色法。铵态氮和硝态氮含量用2 mol·L^{-1}氯化钾溶液提取后,在流动分析仪上进行测定(Autoanalyzer II:Technicon,USA)。全磷含量的测定采用硫酸-高氯酸消煮法-钼锑抗比色法。全钾含量的测定采用火焰光度法。颗粒组成采用激光粒度分析仪(SALD-3001)进行,分析结果采用美国制土壤粒径分级标准:沙粒(>50 μm)、粉粒(2~50 μm)和黏粒(0~2 μm)[19-20]。

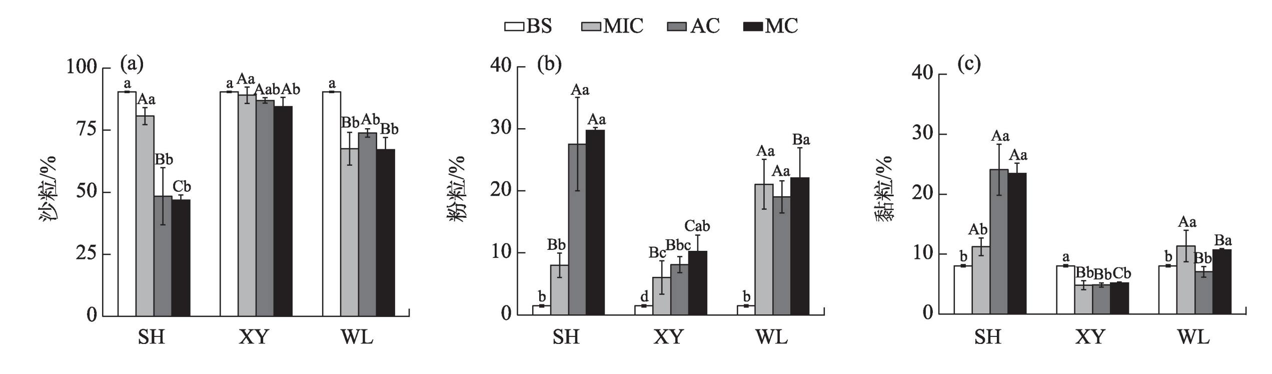
1.4　数据处理

采用Excel 2016、Origin 2021软件和SPSS 24.0软件对数据进行整理、统计分析和制图。结合单因素方差分析法(One-way ANOVA)进行三种灌木群落不同发育阶段生物土壤结皮理化性质之间的差异比较,双因素方差分析法(Two-way ANOVA)分析灌木群落与生物土壤结皮之间的交互作用,解析主要的变异因子。利用最小显著差异法(Least Significant Difference,LSD)进行相关显著性差异检验,P<0.05时,差异具有统计学意义。同时结合斯皮尔曼(Spearman)相关性分析生物土壤结皮、灌木群落与不同生物土壤结皮理化因子之间的相关性。

2　结果与分析

2.1　不同灌木群落生物土壤结皮颗粒组成

沙蒿、小叶锦鸡儿和乌柳群落生物土壤结皮颗粒组成均以沙粒为主,占所有颗粒组成的45%~90%左右,粉粒、黏粒含量较低(图2)。不同类型(微生物结皮、藻结皮、藓类结皮)生物土壤结皮的沙粒含量在小叶锦鸡儿群落中均为最高(89.12%、87.01%、84.54%),在沙蒿群落最低(80.75%、48.39%、46.81%)。粉粒含量在小叶锦鸡儿群落中(6.06%、8.11%、10.25%)均显著低于沙蒿群落(8.00%、



注:图中数据为平均值±标准差,n=3。SH为沙蒿群落;XY为小叶锦鸡儿群落;WL为乌柳群落。BS为裸沙;MIC为微生物结皮;AC为藻结皮;MC为藓类结皮。不同大写字母表示不同灌木群落同一类型生物土壤结皮之间差异显著;不同小写字母表示同一灌木群落不同类型生物土壤结皮之间差异显著(P<0.05)。下同

图2　不同灌木群落生物土壤结皮颗粒组成

Fig. 2　Biological soil crusts composition of particles of different shrubs communities

27.53%、29.72%)及乌柳群落(21.06%、19.03%、22.08%);黏粒含量表现为:沙蒿(11.25%、24.08%、23.47%)>乌柳(11.38%、7.07%、10.71%)>小叶锦鸡儿(4.82%、4.88%、5.21%)。

进一步比较不同灌木群落不同发育阶段生物土壤结皮的土壤颗粒组成,结果表明,随生物土壤结皮发育,三种灌木群落的土壤颗粒组成呈不同的变化趋势。对于沙粒含量,在沙蒿和小叶锦鸡儿群落中,沙粒含量随生物土壤结皮发育逐渐减少;在乌柳群落中,表现为先增加后减少。对于粉粒含量,在沙蒿群落中,粉粒含量随生物土壤结皮发育呈逐渐增加趋势;在小叶锦鸡儿群落中,呈先增加后减少趋势;在乌柳群落中,呈先减少后增加趋势。对于黏粒含量,在沙蒿群落中,黏粒含量随生物土壤结皮发育逐渐增加;在小叶锦鸡儿、乌柳群落中,表现为先减少后增加。

2.2 不同灌木群落生物土壤结皮养分含量

由图3可知,不同类型(微生物结皮、藻结皮、藓

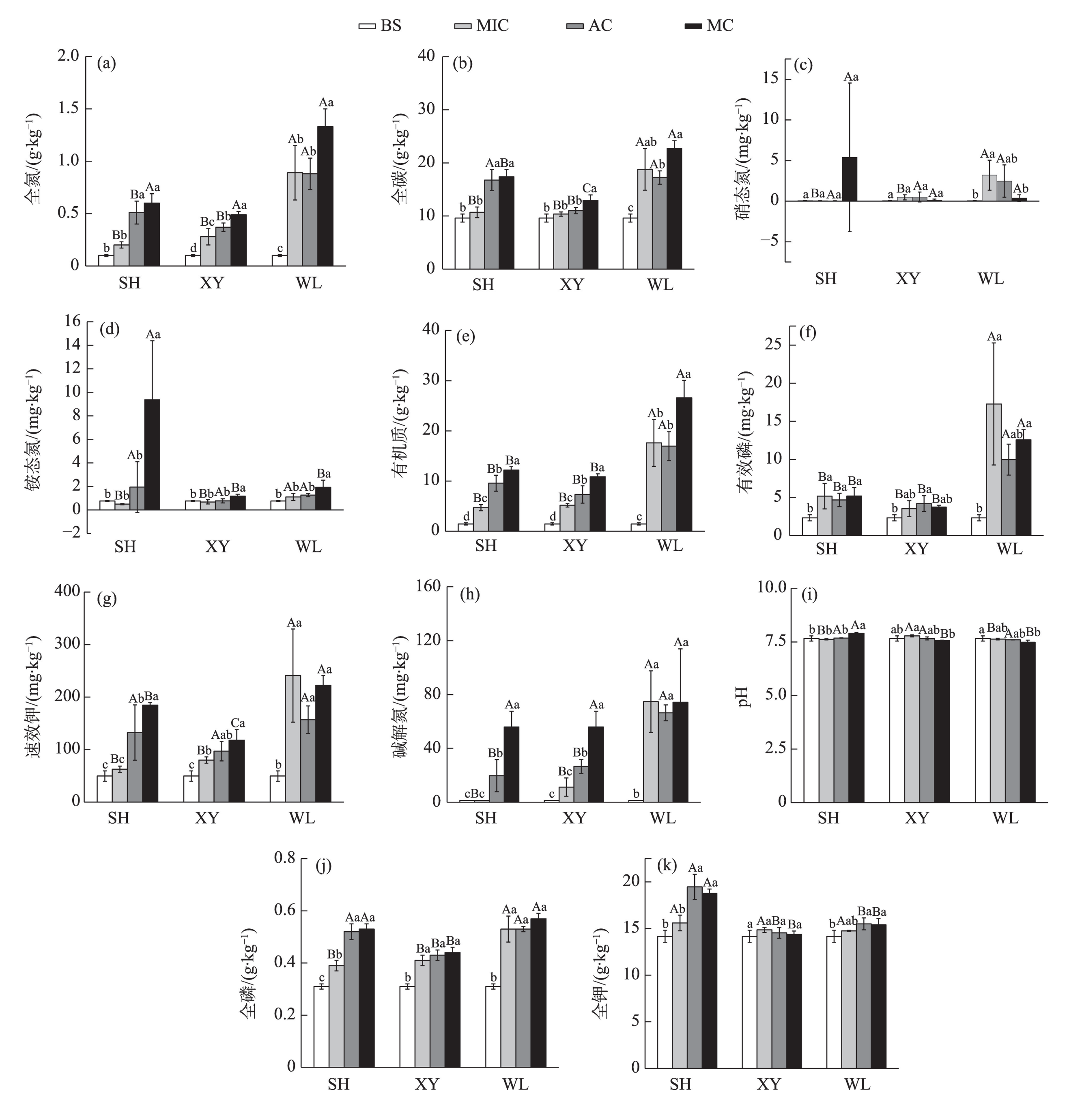


图3 不同灌木群落生物土壤结皮养分特征

Fig. 3 Biological soil crusts nutrient content of different shrubs communitie

类结皮)生物土壤结皮的全氮、全碳、有机质、有效磷、速效钾、碱解氮、全磷的含量均在乌柳群落中显著高于沙蒿、柠条群落。硝态氮含量在三种灌木群落之间均无显著性差异(P>0.05)。对于铵态氮含量,在沙蒿群落中(0.49 $mg\cdot kg^{-1}$、1.94 $mg\cdot kg^{-1}$、9.37 $mg\cdot kg^{-1}$)其含量显著高于乌柳群落(1.10 $mg\cdot kg^{-1}$、1.26 $mg\cdot kg^{-1}$、1.93 $mg\cdot kg^{-1}$)和小叶锦鸡儿群落(0.68 $mg\cdot kg^{-1}$、0.77 $mg\cdot kg^{-1}$、1.17 $mg\cdot kg^{-1}$)。pH值在三种灌木群落之间存在显著差异(P<0.05),为沙蒿(7.62、7.68、7.90)>小叶锦鸡儿(7.78、7.66、7.57)>乌柳(7.63、7.60、7.48)。全钾含量在沙蒿群落中最高,为15.60 $g\cdot kg^{-1}$、19.46 $g\cdot kg^{-1}$、18.77 $g\cdot kg^{-1}$,在其他两个群落之间无显著性差异(P>0.05)。

进一步比较不同灌木群落不同发育阶段生物土壤结皮的养分特征,结果表明,随生物土壤结皮发育,三种灌木群落生物土壤结皮的全氮、全碳、铵态氮、有机质、有效磷、速效钾、全磷、全钾的含量基本呈增加趋势。硝态氮含量在沙蒿、小叶锦鸡儿群落各发育阶段中均无显著变化(P>0.05),在乌柳群落中随生物土壤结皮发育逐渐减少。随生物土壤结皮发育,沙蒿群落中碱解氮含量逐渐增加;在小叶锦鸡儿群落中,碱解氮表现为先增加后减少再增加;在乌柳群落中碱解氮先减少再增加。随生物土壤结皮发育,沙蒿群落中生物土壤结皮的pH值逐渐增大,小叶锦鸡儿和乌柳群落中结皮的pH值逐渐减小

2.3 生物土壤结皮、灌木群落对不同理化性质因子的影响

为探究生物土壤结皮发育阶段、灌木群落及其交互作用(发育阶段×灌木群落)对14个理化性质因子的影响,进行双因素方差分析。由表2可知,发育阶段、灌木群落及发育阶段×灌木群落交互作用对有效磷除外的13个理化因子影响均为显著(P<0.05),三者中灌木群落的影响显著程度最高。其中,对全氮、全碳、铵态氮、有机质、碱解氮、全磷、全钾、沙粒、粉粒、黏粒含量影响的显著程度由大到小为灌木群落>发育阶段>灌木群落×发育阶段交互作用;对硝态氮、速效钾、pH含量影响的显著程度由大到小为发育阶段>灌木群落>灌木群落×发育阶段交互作用;对有效磷含量影响的显著程度由大到小为灌木群落>灌木群落×发育阶段交互作用>发育阶段。

本研究将测得的生物土壤结皮颗粒组成和养分特征因子与灌木生物量、生物土壤结皮盖度、厚度进行斯皮尔曼(Spearman)相关性分析。由表3可知,灌木生物量与生物土壤结皮盖度、厚度、全氮、全碳、有机质、有效磷、速效钾、碱解氮、全磷呈显著正相关,与沙粒含量呈显著负相关(P<0.05)。其中,生物土壤结皮盖度、厚度与有机质含量相关性最强(r=0.998、r=0.772),灌木生物量与有效磷相关性最

表2 生物土壤结皮发育阶段、灌木群落、灌木群落×发育阶段交互作用双因素方差分析

Tab. 2 Two-factor analysis of variance of biological soil crusts development stage, shrub community, shrub community×development stage interaction

指标	全氮			全碳			硝态氮			铵态氮			有机质		
	df	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*
发育阶段	2	9.643	0.003	2	12.463	0.001	2	192.749	0.000	2	47.320	0.000	2	58.023	0.000
灌木群落	2	699.593	0.000	2	77.066	0.000	2	164.313	0.000	2	74.968	0.000	2	319.277	0.000
发育阶段×灌木群落	4	1.543	0.254	4	3.626	0.037	4	140.458	0.000	4	3.930	0.029	4	6.086	0.007

指标	有效磷			速效钾			碱解氮			pH			全磷		
	df	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*
发育阶段	2	0.328	0.727	2	62.607	0.000	2	57.115	0.000	2	54.936	0.000	2	26.616	0.000
灌木群落	2	35.939	0.000	2	35.234	0.000	2	176.004	0.000	2	15.950	0.004	2	52.190	0.000
发育阶段×灌木群落	4	0.364	0.830	4	4.615	0.017	4	7.350	0.003	4	3.769	0.033	4	6.142	0.006

指标	全钾			沙粒			粉粒			黏粒		
	df	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*
发育阶段	2	16.604	0.000	2	49.630	0.000	2	31.473	0.000	2	70.790	0.000
灌木群落	2	37.358	0.000	2	83.092	0.000	2	69.703	0.000	2	53.274	0.000
发育阶段×灌木群落	4	13.732	0.000	4	11.867	0.000	4	8.628	0.002	4	30.980	0.000

注:P < 0.05表示显著性水平较高;P < 0.01表示显著性水平极高。

强(r=0.868)。

3 讨论

生物土壤结皮是荒漠生态系统的重要组成部分,对土壤沙化治理具有重要意义。目前,诸多研究表明,生物土壤结皮可以在一定程度上改变土壤理化性质、促进养分循环、调节土壤生态水文循环等[21]。但由于各地区地理环境上的差异性,不同学者在各研究区得出的结论也不尽相同。本文研究结果表明,共和盆地沙地三种典型灌木群落生物土壤结皮土壤颗粒组成均以沙粒为主(图2),黏粉粒含量较低,与崔燕等[14]在鄂尔多斯沙地、王蕊等[22]在黄土丘陵沟壑区,以及都军等[23]在腾格里沙漠的研究结果一致。不同灌木群落对生物土壤结皮土壤粒径组成有明显影响,小叶锦鸡儿沙粒含量显著较高,与郭志霞等[24]在毛乌素沙地东南缘的研究结果一致。黏粉粒含量表现为:沙蒿>乌柳>小叶锦鸡儿,可能因为沙蒿较小叶锦鸡儿、乌柳低矮,为茎多数丛生的半灌木,近地层分枝多,表层极细物质容易积累,使得生物土壤结皮土壤黏粉粒含量较高[25]。同时,从微生物、藻类到藓类结皮,其地表盖度和粗糙度呈逐渐增大的趋势,富集大气降尘的能力也逐渐增强[26],从而使结皮的厚度、土壤细颗粒物质增大。三种灌木群落的生物土壤结皮沙粒含量均低于裸沙,粉粒和黏粒含量高,表明生物土壤结皮有细化土壤的作用,它的存在显著提高了其土壤黏粉粒含量,这与郭轶瑞等[27]在科尔沁沙地的研究结果一致。

不同灌木群落对生物土壤结皮土壤养分含量的影响表现出差异性,这与邓丽媛等[28]在黑河中游的研究结果一致。乌柳作为杨柳科的灌木或小乔木,其冠幅较大,枝叶较为茂密,使其从风沙中蓄积到大量土壤养分,大部分凋落物分解进入土壤,且其主根系发达,根系分泌物较多,导致其灌丛间生物土壤结皮全氮、全碳、有机质、有效磷、速效钾、碱解氮、全磷含量均在乌柳群落中显著高于其他群落;而枝条较为稀疏且冠幅较小的沙蒿和小叶锦鸡儿凋落物相对较少,从风沙中蓄积到的土壤养分较少,且其主根系相对于乌柳不发达,但侧根系较为发达,侧根将周围土壤中的养分吸收,这可能导致沙蒿、小叶锦鸡儿对生物土壤结皮土壤的养分富集较少[24,28]。生物土壤结皮的形成和发育过程中,土壤全氮、全碳、铵态氮、有机质、有效磷、速效钾、全磷、全钾的含量基本呈增加趋势,这是因为随生物土壤结皮发育,群落中凋落物、分泌物和残体等被微生物不断分解形成腐殖土壤,有效地促进了土壤有机质和土壤养分的积累[29]。细菌、真菌、藻类和藓类植物的出现,使有机质、有效磷、速效钾等养分含量得到富集,且在生物土壤结皮演替过程中死亡的藻类、藓类等增加了生物土壤结皮的养分含量。张鹏等[30]发现,藓类和藻类结皮的固氮速率分别为4~28 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$和14~133 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$,表明生物土壤结皮为干旱区土壤氮提供了重要来源。不同发育阶段生物土壤结皮的铵态氮含量均高于裸沙,生物土壤结皮中的微生物通过矿化作用将这些有机氮转化,使其快速吸收氮素,使得铵态氮含量升高[31]。

双因素方差分析结果显示,灌木群落对生物土壤结皮理化性质的影响显著高于发育阶段及发育阶段×灌木群落交互作用(表2)。不同灌木群落对生物土壤结皮盖度、厚度、理化性质有明显影响,使其结皮中土壤细颗粒物含量以及有机质等养分含量表现出差异性。沙蒿较小叶锦鸡儿、乌柳低矮,为从基部多分枝的半灌木,其灌丛间生物土壤结皮土壤土质变细,粒径变小,粉粒含量较高,使其生物土壤结皮盖度增加,减缓了风蚀作用所带来的影响,更有利于细颗粒物的黏聚,与其他因子之间的相互作用能力也增强[32-34]。乌柳为灌木或小乔木,其冠幅较大,枝叶较为茂密,根系发达,生物土壤结皮通过捕获大气和降雨所带来的养分颗粒较多,从而进一步促进结皮厚度的增加,能够防止大面积土壤侵蚀而保护这些养分[14]。灌木生物量与有机质、全氮、速效钾、碱解氮、全碳、全磷、全钾、粉粒、黏粒、有效磷含量、结皮盖度、结皮厚度呈显著正相关,与沙粒含量呈显著负相关(P<0.05),进一步证实了在生物量最高的乌柳群落中养分含量最高。生物土壤结皮盖度、厚度与土壤有机质、全氮、速效钾、碱解氮、全碳、全磷、粉粒、有效磷、铵态氮含量呈显著正相关(P<0.05),与沙粒含量(P=0.000)呈显著负相关(表3),这表明生物土壤结皮的形成和发育增加了土壤环境中细颗粒物含量及有机质等养分含量[9,23]。本文研究结果表明,有机质含量与生物土壤结皮盖度、厚度的相关性最强(P<0.05),有机质

表3　生物土壤结皮盖度、厚度、灌木生物量与理化性质的相关性分析

Tab. 3　Correlation analysis of biological soil crusts coverage, thickness, shrub biomass and physical and chemical

	沙粒	全氮	全碳	有机质	有效磷	速效钾	碱解氮	全磷	结皮盖度	结皮厚度	灌木生物量
沙粒	1.000										
全氮	−0.691**	1.000									
全碳	−0.823**	0.942**	1.000								
有机质	−0.657**	0.982**	0.929**	1.000							
有效磷	−0.636**	0.795**	0.823**	0.800**	1.000						
速效钾	−0.724**	0.943**	0.937**	0.939**	0.754**	1.000					
碱解氮	−0.635**	0.936**	0.891**	0.947**	0.748**	0.933**	1.000				
全磷	−0.800**	0.956**	0.961**	0.929**	0.761**	0.931**	0.888**	1.000			
结皮盖度	−0.659**	0.981**	0.928**	0.998**	0.799**	0.939**	0.940**	0.927**	1.000		
结皮厚度	−0.619**	0.695**	0.682**	0.722**	0.401*	0.671**	0.633**	0.673**	0.713**	1.000	
灌木生物量	−0.679**	0.792**	0.768**	0.772**	0.868**	0.679**	0.684**	0.742**	0.776**	0.443*	1.000

注:*表示 $P < 0.05$,显著性水平较高;**表示 $P < 0.01$,显著性水平极高。

含量在乌柳群落中最高,小叶锦鸡儿群落中最低(图3),这也进一步印证了结皮的厚度和盖度在有机质含量最高的乌柳群落中最高。生物土壤结皮的形成发育是一个动态的过程,生物土壤结皮的发育能够改善土壤理化性质,相反,土壤颗粒组成的变化以及水分养分的增加也能改良生物土壤结皮结构、促进生物土壤结皮的发育。本文仅对青海共和盆地沙地不同灌木群落生物土壤结皮理化性质进行了分析,而从小气候、枯落物或不同植物的分泌物等多角度研究不同灌丛与生物土壤结皮的关系,还有待进一步深入。

4　结 论

沙蒿、小叶锦鸡儿、乌柳群落均可以显著改善生物土壤结皮物理结构,增加生物土壤结皮养分含量,其中沙蒿群落更有利于土壤的细化,乌柳群落更有利于养分蓄积。灌木群落对生物土壤结皮理化性质的影响最大,且灌木生物量与生物土壤结皮盖度、厚度及理化因子显著相关。三种灌木作为共和盆地沙地优良的固沙植被,理化性质存在显著差异,开展旱区荒漠的生态建设时,充分考虑植被类型对生物土壤结皮发育的影响,对有效改良共和盆地沙地土壤结构,深入认识共和盆地沙地生物土壤结皮的形成发育以及生态功能具有重要意义,为植被恢复与重建提供依据。

参考文献(References):

[1]　李新荣, 谭会娟, 回嵘, 等. 中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究[J]. 科学通报, 2018, 63(23): 2320−2334. [Li Xinrong, Tan Huijuan, Hui Rong, et al. Researches in biological soil crust of China: A review[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(23): 2320−2334.]

[2]　周虹, 吴波, 高莹, 等. 毛乌素沙地臭柏(*Sabina vulgaris*)群落生物土壤结皮细菌群落组成及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 130−141. [Zhou Hong, Wu Bo, Gao Ying, et al. Composition and influencing factors of the biological soil crust bacterial communities in the *Sabina vulgaris* community in Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 130−141.]

[3]　姚宏佳, 王宝荣, 安韶山, 等. 黄土高原生物结皮形成过程中土壤胞外酶活性及其化学计量变化特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 456−468. [Yao Hongjia, Wang Baorong, An Shaoshan, et al. Variation in soil extracellular enzyme activities stoichiometry during biological soil crust formation in the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 456−468.]

[4]　李新荣. 荒漠生物土壤结皮生态与水文学研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012. [Li Xinrong. Study on Ecology and Hydrology of Desert Biological Soil Crusts[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.]

[5]　Lan S, Wu L, Zhang D, et al. Successional stages of biological soil crusts and their microstructure variability in Shapotou region (China)[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(4): 77−88.

[6]　吴丽, 张高科, 陈晓国, 等. 生物结皮的发育演替与微生物生物量变化[J]. 环境科学, 2014, 35(4): 1479−1485. [Wu Li, Zhang Gaoke, Chen Xiaoguo, et al. Development and succession of biological soil crusts and the changes of microbial biomasses[J]. Environmental Science, 2014, 35(4): 1479−1485.]

[7]　Rodríguez-caballero E, Castro A J, Chamizo S, et al. Ecosystem services provided by biocrusts: From ecosystem functions to social values[J]. Journal of Arid Environments, 2017, 159(12): 45−53.

[8]　谢婷, 李云飞, 李小军. 腾格里沙漠东南缘固沙植被区生物土壤结皮及下层土壤有机碳矿化特征[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2339−2348. [Xie Ting, Li Yunfei, Li Xiaojun. Organic carbon min-

eralization of biological soil crusts and subsoils in the revegetated areas of the southeast fringe of the Tengger Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2339–2348.]

[9] Xiao B, Sun F H, Hu K L, et al. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem[J]. Journal of Hydrology, 2019, 568(8): 792–802.

[10] Zhang Z S, Chen Y L, Xu B X, et al. Topographic differentiations of biological soil crusts and hydraulic properties in fixed sand dunes, Tengger Desert[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(2): 205–215.

[11] 秦福雯, 康濒月, 姜风岩, 等. 生物土壤结皮演替对高寒草原植被结构和土壤养分的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6): 1100–1107. [Qin Fuwen, Kang Binyue, Jiang Fengyan, et al. Effects of biological soil crust succession on vegetation structure and soil nutrients in alpine steppe[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(6): 1100–1107.]

[12] 闫德仁, 黄海广, 张胜男, 等. 沙漠苔藓生物结皮层养分及颗粒组成特征[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(10): 111–116. [Yan Deren, Huang Haiguang, Zhang Shengnan, et al. Nutrients and particle composition characteristics in moss biological crusts[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(10): 111–116.]

[13] Jiang Z Y, Li X Y, Wei J Q, et al. Contrasting surface soil hydrology regulated by biological and physical soil crusts for patchy grass in the high-altitude alpine steppe ecosystem[J]. Geoderma, 2018, 326(8): 201–209.

[14] 崔燕, 吕贻忠, 李保国. 鄂尔多斯沙地土壤生物结皮的理化性质[J]. 土壤, 2004, 36(2): 197–202. [Cui Yan, Lv Yizhong, Li Baoguo. Physico-chemical properties of soil microbiotic crusts on Erdos Plateau[J]. Soils, 2004, 36(2): 197–202.

[15] 周小泉, 刘政鸿, 杨永胜, 等. 毛乌素沙地三种植被下苔藓结皮的土壤理化效应[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 340–344. [Zhou Xiaoquan, Liu Zhenghong, Yang Yongsheng, et al. Effects of moss dominated crusts on soil physicochemical properties under three types of vegetation in Mu Us Sandland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(6): 340–344.]

[16] 李晓英, 姚正毅, 董治宝. 青海省共和盆地沙漠化驱动机制[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 337–344. [Li Xiaoying, Yao Zhengyi, Dong Zhibao. Driving mechanism of aeolian desertification in Gonghe Basin of Qinghai Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 337–344.]

[17] 辜晨, 贾晓红, 吴波, 等. 高寒沙区生物土壤结皮覆盖土壤碳通量对模拟降水的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4423–4433. [Gu Chen, Jia Xiaohong, Wu Bo, et al. Effect of simulated precipitation on the carbon flux in biological-soil crusted soil in alpine sandy habitats[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4423–4433.]

[18] 刘丽颖, 贾志清, 朱雅娟, 等. 高寒沙地不同林龄中间锦鸡儿的水分利用策略[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(5): 119–125. [Liu Liying, Jia Zhiqing, Zhu Yajuan, et al. Water use strategy of different stand ages of *Caragana* intermedia in alpine sandland[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(5): 119–125.]

[19] Zhang T, Jia R L, Yu L Y. Diversity and distribution of soil fungal communities associated with biological soil crusts in the southeastern Tengger Desert (China) as revealed by 454 pyrosequencing[J]. Fungal Ecology, 2016, 23(2): 156–163.

[20] 莫秋霞, 宋炜, 卜崇峰, 等. 油蒿与沙柳灌木地藓结皮发育差异研究[J]. 干旱区研究, 2023, 40(6): 979–987. [Mo Qiuxia, Song Wei, Bu Chongfeng, et al. Differences in moss crust development between *Artemisia ordosica* and *Salix pasmmophia* shrubs[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(6): 979–987.]

[21] Kakeh J, Gorji M, Sohrabi M, et al. Effects of biological soil crusts on some physicochemical characteristics of rangeland soils of Alagol, Turkmen Sahra, NE Iran[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 181(4): 152–159.

[22] 王蕊, 朱清科, 卜楠, 等. 黄土丘陵沟壑区生物土壤结皮理化性质[J]. 干旱区研究, 2010, 27(3): 401–408. [Wang Rui, Zhu Qingke, Bu Nan, et al. Study on physicochemical properties of biological soil crusts in the hilly-gully regions of the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(3): 401–408.]

[23] 都军, 李宜轩, 杨晓霞, 等. 腾格里沙漠东南缘生物土壤结皮对土壤理化性质的影响[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 111–116. [Du Jun, Li Yixuan, Yang Xiaoxia, et al. Effects of biological soil crusts types on soil physicochemical properties in the southeast fringe of the Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 111–116.]

[24] 郭志霞, 刘任涛, 冯永宏, 等. 不同降水对荒漠灌丛土壤理化性质和地表植被分布的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 56–65. [Guo Zhixia, Liu Rentao, Feng Yonghong, et al. Effects of different precipitation on soil properties and ground vegetation distribution in desert shrub microhabitats[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 56–65.]

[25] Zhang K H, Hu G L, Zhang Y J, et al. Distribution characteristics and influencing factors of soil water content in the root zone of *Haloxylon ammodendron* in desert-oasis ecotone in the middle reaches of the Heihe Rive[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 16–25.

[26] Li X R, Zhang J G, Wang X P, et al. Study on soil microbiotic crust and its influences on sand-fixing vegetation in arid desert region [J]. Acta Botanica Sinica, 2000, 42(9): 965–970.

[27] 郭轶瑞, 赵哈林, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地结皮发育对土壤理化性质影响的研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 135–139. [Guo Yirui, Zhao Halin, Zhao Xueyong, et al. Study on crust development and its influences on soil physicochemical properties in Horqin Sand[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21 (1): 135–139.]

[28] 邓丽媛, 胡广录, 周川, 等. 荒漠绿洲过渡带不同固沙植物根区土壤养分空间分布特征[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(5): 17–23. [Deng Liyuan, Hu Guanglu, Zhou Chuan, et al. Spatial distribution characteristics of the soil nutrients in root zones with differ-

ent sand fixing plants in the transition zone of desert Oasis[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(5): 17−23.]

[29] 刘艳梅, 李新荣, 何明珠, 等. 生物土壤结皮对土壤微生物量碳的影响[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 669−673. [LiuYanmei, Li Xinrong, He Mingzhu, et al. Effects of biological soil crusts on soil microbial biomass carbon[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(3): 669−673.]

[30] 张鹏, 李新荣, 张志山, 等. 腾格里沙漠东南缘生物土壤结皮的固氮潜力[J]. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2157−2164. [Zhang Peng, Li Xinrong, Zhang Zhishan, et al. Nitrogen fixation potential of biological soil crusts in southeast edge of Tengger Desert, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(8): 2157−2164.]

[31] 周虹, 刘雲祥. 高寒沙区土壤结皮对浅层土壤理化性质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(8): 154−160. [Zhou Hong, Liu Yunxiang. Effects of soil crusts on physicochemical properties of shallow soil in alpine sandy area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(8): 154−160.]

[32] 方海燕, 屈建军, 俎瑞平, 等. 防沙工程的结皮效应研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 17−20. [Fang Haiyan, Qu Jianjun, Zu Ruiping, et al. Research on effect of sand prevention and control engineering on formation of physical crust[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 17−20.]

[33] 吴永胜, 哈斯, 李双权, 等. 毛乌素沙地南缘沙丘生物土壤结皮发育特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 258−261. [Wu Yongsheng, Ha Si, Li Shuangquan, et al. Development characteristics of biological soil crusts on sand dune in southern Mu Us Sandyland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 258−261.]

[34] 李尝君, 曾凡江, 郭京衡, 等. 植被恢复程度与沙地土壤性质——以塔克拉玛干沙漠南缘为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1061−1067. [Li Changjun, Zeng Fanjiang, Guo Jingheng, et al. Soil properties of different sandy lands under different vegetation recovering levels: A case in southern Taklimakan Desert[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1061−1067.]

Differences in the physical and chemical properties of biological soil crusts in different shrub communities in the Gonghe Basin

ZHANG Manyu[1,2], WANG Zhitao[2], DENG Lei[2,3], ZHOU Hong[2]

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China; 2. Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China; 3. Qinghai Provincial Forestry and Grassland Project Service Center, Xining 810016, Qinghai, China)

Abstract: Exploring the differences in the physical and chemical properties of biological soil crusts (BSCs) in different shrub communities in the Gonghe Basin of Qinghai Province to provide theoretical reference for the protection and rational utilization of BSCs resources. The BSCs at different stages of *Artemisia desertorum, Caragana microphylla, Salix cheilophila* communities in the Gonghe Basin were investigated. Particle composition and nutrient characteristics were studied through field sampling and indoor analysis. The results showed that the particle composition of BSCs in the three shrub communities was dominated by sand (45%−90%). The sand content of *Caragana microphylla*>*Salix cheilophila*>*Artemisia desertorum* was significantly higher than that of bare sand between shrubs. The contents of total nitrogen, total carbon, organic matter, available phosphorus, available potassium, alkali-hydrolyzable nitrogen, total phosphorus in the BSCs of the *Salix cheilophila* community were significantly higher than other, and the contents increased with the development of BSCs in the three shrub communities. The shrub community mostly influenced the physical and chemical properties of BSCs, and the shrub biomass was significantly positively correlated with the coverage, thickness, total nitrogen, total carbon, organic matter, available phosphorus, available potassium, available nitrogen, and total phosphorus of BSCs, and significantly negatively correlated with sand content ($P<0.05$). The shrub community effectively improved the soil structure of BSCs in the sandy land of the Gonghe Basin. The *Artemisia desertorum* community was more conducive to soil refinement, and the *Salix cheilophila* community was more conducive to nutrient accumulation.

Keywords: biological soil crusts; shrub communities; differences in physicochemical properties; Gonghe Basin